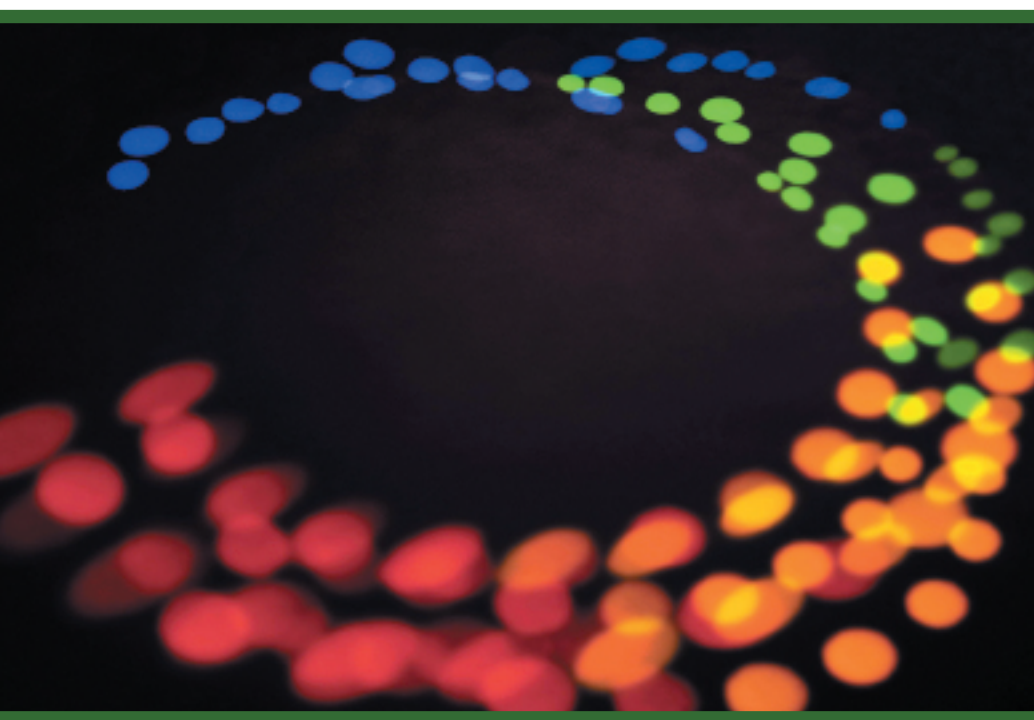


Оскар Фернандес (Oscar Fernández) | Роландо Феррени (Rolando Ferrini) |  
 Лейре Барруэтабена (Leire Barruetabeña) | Сорин Иванович (Sorin Ivanovic)  
 Перевод: Василина Рочева

# Ультратонкий светодиодный модуль прямой подсветки с тонкопленочной оптической системой

Тонкие, высококачественные светодиодные панели все еще трудоемки в изготовлении. Компании CSEM, GAIKER-IK4 и BASF SE совместно исследовали и разработали новый подход и представляют в данной статье решение, использующее недорогие ультрахолодные белые светодиоды с неполноценным спектром в сочетании с цветообразующими пленками, позволяющими преобразовать излучение в свет высокого качества, а также описывают комбинацию с добавлением красных и желтых светодиодов в качестве решения для управления цветностью.



Благодаря продуманной интеграции оптических пленок, используемых для перераспределения потока излучения, получаемая высокая однородность яркости становится причиной того, что общая толщина модуля оказывается значительно меньше расстояния между светодиодами. Кроме того, предложенное оптическое решение создает направленную безбликовую картину освещения.

Используя подходящую цветообразующую пленку (Color Conversion Foil, CFF), содержащую органические люминофоры, которые дают характерный для них широкий спектр, можно получить теплый белый свет с превосходными параметрами цветопередачи, используя при этом недорогие ультрахолодные белые светодиоды с неполноценным спектром.

Гибкость пленок, применяемых для управления световым потоком, и цветообразующей пленки делает возможным их производство с помощью экономически выгодных процессов прокатки в рулон.

С другой стороны, включение в модуль независимо управляемых цветных светодиодов позволяет настраивать координаты цветности светильника, лежащие на кривой Планка, хотя это и оказывает определенное влияние на параметры цветопередачи. Представленное решение для управления освещением работает в широком диапазоне координат цветности благодаря хорошим возможностям смешения цветов. Также существует возможность улучшения обоих аспектов.

Структура затрат модуля, исследованная с помощью анализа по затратам жизненного цикла, показала, что основным фактором в стоимости модуля является использование цветных светодиодов.

## Светодиодные панели для высококачественного освещения

В настоящее время светодиоды могут иметь чрезвычайно высокие уровни яркости (свыше  $10\,000$  кд/м<sup>2</sup>). Однако из-за их небольших размеров ( $\leq 1$  мм<sup>2</sup>) общий поток обычно не превышает нескольких десятков люменов, что слишком мало для большинства осветительных применений, требующих значений на два порядка выше. Поэтому в светодиодных осветительных устройствах с высоким потоком используются светодиодные матрицы.

Очень часто свет, излучаемый светодиодами, обладающими обычно ламбертовским

распределением, должен быть перераспределен в зависимости от осветительной задачи. Например, если они не оснащены соответствующей вторичной (а часто и третичной) оптикой, светодиодные модули освещают соседние объекты неравномерно и вызывают множественные тени.

Ламбертовские источники света, такие как светодиоды, подходят для освещения плоских (т. е. нечувствительных к много-теневым эффектам) поверхностей, находящихся в непосредственной близости, например ЖК-дисплеев, или местного освещения, но они не пригодны для больших расстояний, если для формирования пространственного распределения силы света не используются соответствующие оптические решения [1].

С другой стороны, средний человеческий глаз может видеть в диапазоне яркости около девяти порядков — от 1/1000 до 100 000 люкс [2]. Такой большой динамический диапазон достигается благодаря нескольким процессам, включая изменение размера зрачка [3]. Непрерывная адаптация, требуемая при воздействии очень разных уровней яркости, часто приводит к усталости глаз [4].

Кроме того, сильно (пространственно) концентрированное световое излучение и одновременно высокие (ламбертовские) уровни яркости создают блики и, в конечном итоге, приводят к потере видимости, дискомфорту и раздражению органа зрения [5]. Этот вопрос заслуживает особого внимания в области профессионального освещения, где обычно присутствуют отражающие поверхности, такие как экраны компьютеров. Кроме того, при ярком освещении воспринимаемые характеристики дисплеев страдают от ухудшения видимого уровня серого, от снижения видимого контраста и от уменьшенной воспринимаемой цветовой гаммы [6, 7].

Очевидно, что разработка и внедрение эффективных решений для формирования кривой силы света (КСС) будет способствовать уменьшению количества потерянного света (оценено как 30% в наружном освещении [8]), следовательно, снижению потребления энергии и минимизации потенциального негативного воздействия на здоровье человека [5, 9].

В светодиодных панелях свет, излучаемый относительно большим числом светодиодов, равномерно распределяется на большую площадь (обычно около 600×600 мм).

В так называемой конфигурации с прямой подсветкой светодиоды распределены более или менее равномерно по всей поверхности плоской подложки. Они освещают светорассеивающую пластину, расположенную на определенном расстоянии  $d$  над ними. Чтобы добиться равномерной яркости по всему рассеивателю, его необходимо расположить на расстоянии от светодиодов, превышающем шаг между соседними светодиодами  $t$ . Отношение этих двух величин часто упоминается как отношение дистанции к высоте,  $DHR = t/d$  (Distance-to-Height Ratio).

Преимущества конструкции с прямой подсветкой по сравнению с альтернативным способом — боковой подсветкой — описаны в [10].

Основными составляющими модуля LASSIE-FP7 являются светодиодная плата со встроенной системой отведения тепла, пленка для перераспределения хода лучей, цветообразующая пленка и система интеллектуального управления. В данной статье представлены компоненты для перераспределения хода лучей и изменения спектрального состава излучения. Описание светодиодной пластины и системы интеллектуального управления можно найти в [11] и [12] соответственно.

### Оптические решения для ультратонких светодиодных панелей

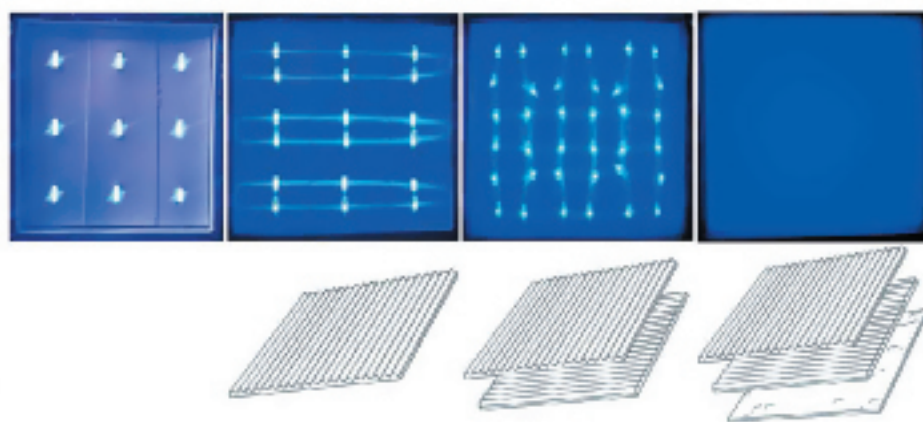
Тонкие панели ( $DHR \gg 1$ ) выгодны не только с эстетической точки зрения, но и из-за экономии пространства/веса благодаря скрытому/подвесному монта-

жу. Кроме того, оба эти аспекта снижают стоимость хранения и транспортировки изделий.

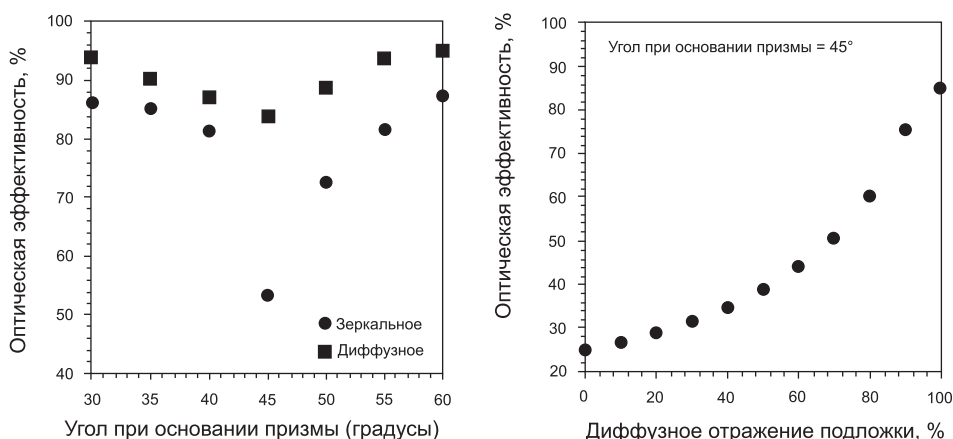
С эстетической точки зрения однородное распределение яркости по всей излучающей области модуля очень желательно, поскольку оно фокусирует внимание на самом свете, а не на его источниках. Известно, что человеческое зрение ориентируется на градиент, а не на абсолютные уровни яркости [13, 14], и это представляет собой реальную проблему для панелей с прямой подсветкой с  $DHR \gg 1$ .

DHR можно уменьшить, преобразовав ламбертовскую диаграмму в диаграмму «бабочку» с помощью линз, что станет причиной значительного увеличения стоимости изделия. В качестве альтернативы с помощью оптического моделирования было предложено точечное микроструктурирование [7]. К сожалению, экспериментальная демонстрация до сих пор оказывалась безуспешной из-за технологических ограничений при изготовлении рассчитанных оптических микроструктур.

В проекте LASSIE-FP7 мы разработали решение, основанное на сочетании нескольких слоев тонких оптических пленок, которое создает очень однородное распределение яркости (равномерность яркости около 86%) по всему излучателю при сохранении большого значения DHR (около 1,67) и оптической эффективности около 70%. Примечательно, что на получаемый результат не влияет выравнивание пленок относительно светодиодов или друг друга, что облегчает их интеграцию в модуль.



**Рис. 1.** Вид сверху на светодиодную матрицу 3×3 размером 50×50 мм, с разными комбинациями пленок. Использовалась подложка с высоким коэффициентом отражения (98%). Все пленки имеют толщину менее 200 мк



**Рис. 2.** Результаты расчетов оптической эффективности светодиодной матрицы и двух взаимно перпендикулярных призматических пленок в зависимости от угла при основании призмы (слева). Рассматриваются два случая: 100% диффузное и 100% зеркальное отражения. Пленки расположены на расстоянии 10 мм от источника. Расчетная оптическая эффективность того же модуля в случае угла призмы 45° в зависимости от коэффициента отражения подложки (справа)

В дополнение к многослойному тонкопленочному рассеивателю оптическая система содержит две (одинаковые) призматические пленки, ориентированные друг относительно друга перпендикулярно, что создает эффект рекурсии [15] и возможность удвоения характеристик микропризм [16] (рис. 1).

Оптимальный угол при основании микропризмы был определен с помощью программного обеспечения оптического моделирования ZEMAX Ray-Tracing.



**Рис. 3.** Вид сверху на модуль (20×20 см) LASSIE-FP7 с многослойной оптической системой (слева) и без нее (справа). Многослойная система преобразует неоднородное распределение света, обусловленное точечными источниками света, в пространственно однородную излучающую поверхность

На рис. 2 слева показана прогнозируемая оптическая эффективность светодиодной матрицы с двумя призматическими пластинами в зависимости от угла при основании призмы. Предполагалось, что светодиодная подложка является идеально (зеркально или диффузно) отражающей. На угле 45° наблюдается спад эффективности, где эффект рекурсии, то есть смешение света, максимален. Рассеивающие отражатели преобразуют рекурсию в режимы излучения, обеспечивая переотражение от подложки, что дает высокую эффективность и оптимальное смешение света.



**Рис. 4.** Макет светодиодной панели с системой регулировки

Поскольку смешение света достигается, главным образом, за счет переотражения света в режиме рекурсии, для достижения низких оптических потерь следует обязательно использовать высокоотражающие подложки (рис. 2, справа). Мы выбрали белую отражающую пленку с измеренным коэффициентом диффузного отражения 98% при нормальном падении в видимом диапазоне.

Способность разрабатываемых решений гомогенизировать светодиодный свет показана на рис. 3. Следует отметить, что, в отличие от стандартных микропризматических пленок (таких как, например, пленки для улучшения яркости 3M, BEF), пленки, используемые в LASSIE-FP7, показывают хорошее рассеяние и ахроматичность даже при ярком освещении.

В дополнение к смешению света и удвоению источника микропризматические структуры усиливают излучение по оси, перенаправляя излучение, выходящее под большими углами (рис. 4 и 5). Несмотря на узкую КСС, описанное решение не создает блескости и хорошо подходит для освещения отдаленных объектов.

## Высококачественный спектр излучения

Человеческий глаз не может различать метамерически идентичные визуальные стимулы (т. е. излучение с одинаковыми координатами цветности). Однако мы видим объекты вокруг нас благодаря свету, который они отражают, и, следовательно, их внешний вид (особенно цвет) опреде-

Таблица 1. Основные характеристики спектральных распределений излучения, показанных на рис. 6 и 7

	A	C	D	E	F	G
КЦТ (К)	2951	3000	3500	4000	4500	5000
$\Delta u'v'$	0,0004	0,0001	-0,0001	0,0001	0	0,0001
CRI	>93	87	87	85	82	79
R9	41	83	98	81	63	45
Rf (TM-30-15)	-	83	82	83	78	75
Rg (TM-30-15)	-	111	108	106	104	103

ляется собственной природой объектов, а также спектральным распределением источника света.

Способность света визуализировать естественные цвета, называемая цвето-передачей, определяется в Международном светотехническом словаре МКО как «влияние источника света на цветное изображение объектов сознательным или подсознательным сравнением с их цветом при контрольном освещении» [17].

Если данный цвет (длина волны) отсутствует или недостаточно представлен в спектре излучения источника света, его не будет и в отраженном свете [18]. Поэтому широкополосные спектральные характеристики без провалов передают цвет лучше.

Светодиоды с высокой цветопередачей предлагают такие известные производители, как OSRAM, Cree и Lumileds [19, 20, 21].

Однако из анализа по затратам жизненного цикла (см. раздел «Анализ затрат») мы определили, что наибольший вклад в стоимость модуля LASSIE-FP7, безусловно, вносит стоимость самих светодиодов. Использование дорогих светодиодов с высокой цветопередачей неизбежно приводит к недопустимо высокой стоимости конечного изделия.

### Экономичное решение для получения высококачественного спектра

Запатентованные цветообразующие пленки компании BASF предлагают отличную с точки зрения стоимости альтернативу для достижения высокой цветопередачи. Гибкие CCF содержат эффективные органические люминофоры, встроенные в тонкую полимерную пленку. CCF производятся с помощью процессов прокатки в рулон, что, вместе с небольшим количеством люминофоров, необходимых для требуемого преобразования длины волны излучения,

делает их экономически выгодным решением.

Спектральные характеристики высококачества (столбец А в табл. 1, рис. 6) получены экспериментально с использованием CCF в сочетании с недорогими светодиодами LUXEON3014 холодного цвета излучения (CCT~8000 К) с низким индексом цветопередачи (CRI~70).

Значения световой отдачи составили 102 и 87 лм/Вт с CCF и без CCF соот-

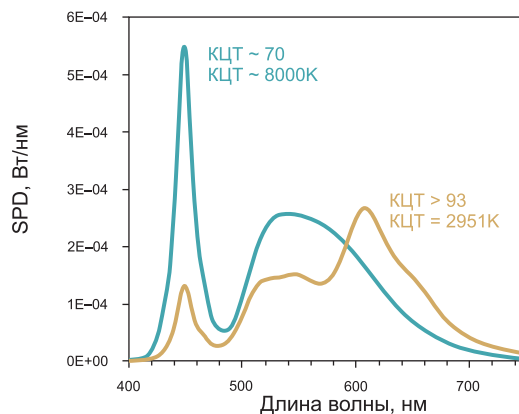


Рис. 6. Спектральная плотность потока излучения SPD (слева) холодных белых (~8000 К) светодиодов с BASF CCF (коричневая кривая) и без BASF CCF (синяя кривая). Значения КЦТ и CRI приведены на рисунке. Изображение рулона BASF CCF (справа)

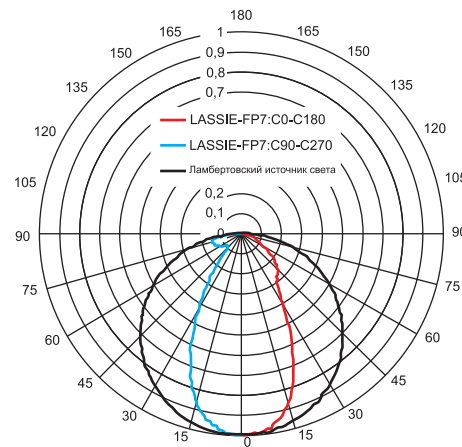
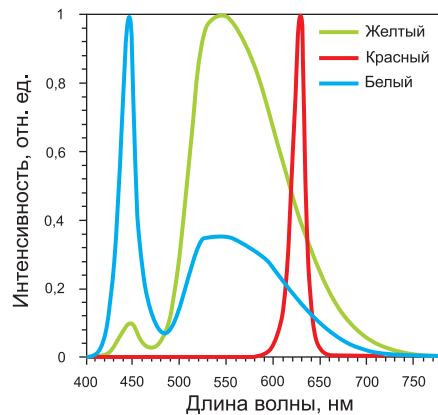
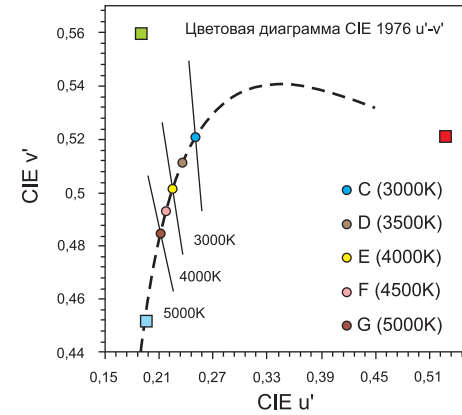


Рис. 5. Экспериментально измеренное распределение силы света

ветственно. Стоксовские потери пленки составляют всего 7,7%, а неидеальная квантовая эффективность CCF добавляет еще 9% потерь.



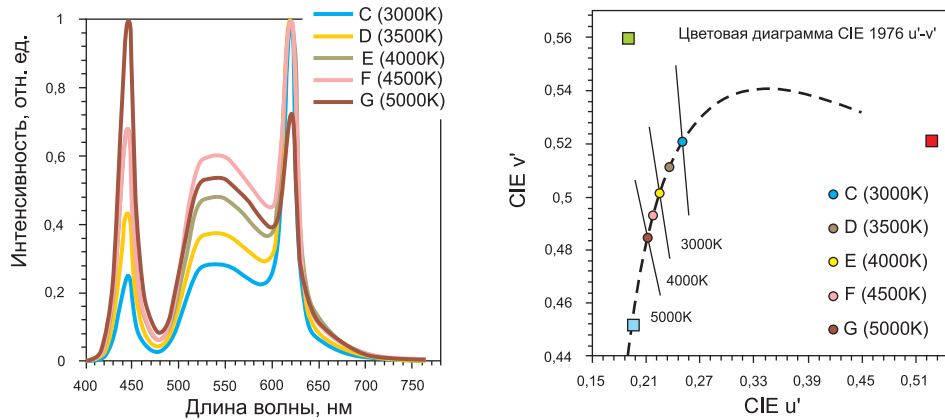
Рис. 7. Спектры излучения (слева) и координаты цветности (справа) выбранных светодиодов (по данным поставщика)



**Спектральная регулировка с помощью индивидуально управляемых цветных светодиодов**

В начале этого века на сцену вышло так называемое человеко-ориентированное

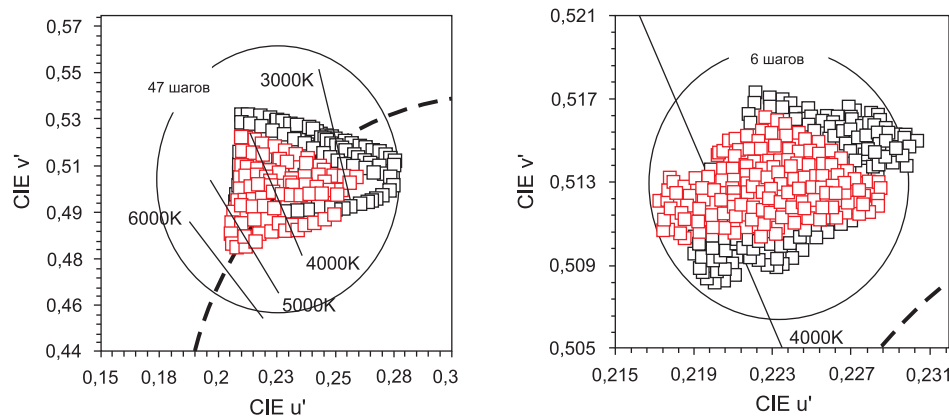
освещение (Human Centric Lighting, HCL). Среди прочих особенностей в HCL используется регулировка спектрального состава излучения с помощью светодиодных модулей с независимым управлением питанием светодиодов разного цвета [22].



**Рис. 8.** Расчетные спектры излучения (слева), полученные для 3000 К (С), 3500 К (D), 4000 К (E), 4500 К (F) и 5000 К (G) с помощью красных светодиодов 3014L, а также красных и желтых светодиодов 3535L при различных уровнях интенсивности излучения. Координаты CIE u'v' (справа)



**Рис. 9.** Излучающая поверхность модуля LASSIE-FP7, настроенного на разные цвета, демонстрирующая, что решение управления освещением CSEM обеспечивает отличные показатели смещения света



**Рис. 10.** Координаты цветности CIE u' и v', измеренные по излучающей поверхности модуля LASSIE-FP7 с рассеивателем (слева) и с трехплочным решением (справа)

В LASSIE-FP7 мы изучили цветные настраиваемые светодиодные панели с цветными светодиодами (LUXEON 3535L желтого и красного цвета), чьи цветовые координаты CIE u'v' и спектры излучения приведены на рис. 7. Поскольку цветовое пространство, получаемое с помощью светодиодов, содержит все интересующие нас значения координат цветности, то координаты, лежащие на кривой Планка в диапазоне 3000–5000 К, могут быть достигнуты путем выбора соответствующих параметров питания на каждом из каналов (рис. 8).

Основные показатели спектрального распределения излучения приведены в столбцах С–G таблицы 1, где можно увидеть, что цветопередача уменьшается с увеличением «холодности» света, особенно в критериях ТМ-30-15. Эти результаты показывают, что для регулировки цветности вдоль кривой Планка и сохранения высокого спектрального качества требуются дополнительные цветовые каналы. В конце концов, технология ССF может использоваться совместно с цветными светодиодами для уменьшения падения качества в холодном белом цвете.

Более того, добавление цветных светодиодов приводит еще к одному интересному преимуществу, поскольку в сочетании с интеллектуальной системой управления они могут компенсировать цветовой дрейф белых светодиодов, который, вероятно, возникнет по мере деградации люминофора.

И, наконец, описанная выше тонкопленочная оптическая система продемонстрировала хорошие способности смещения цветов (рис. 9 и 10), обеспечивая однородность цвета лучше трехшагового эллипса МакАдама по всем углам наблюдения при измерении в фиксированной точке модуля.

Пространственная цветовая вариация в значительной степени является следствием расположения светодиодов (рис. 3), где светодиоды разных цветов разделены большим расстоянием. Ожидается, что размещение светодиодов в виде кластеров приведет к однородности цветности лучше трехшагового эллипса МакАдама.

**Таблица 2.** Полная стоимость владения модуля LASSIE-FP7 для разных фаз

Фаза жизненного цикла	Стоимость, €
Производство	320
Эксплуатация	37
Утилизация	-0.26 (выгода)

### Анализ затрат

Полная стоимость владения (Life Cycle Cost, LCC) — это инструмент, который учитывает все затраты, непосредственно связанные с изделием на протяжении всего его жизненного цикла — от извлечения ресурсов, далее по цепочке поставок и до этапа эксплуатации и утилизации. Постоянная обратная связь, обеспечиваемая LCC, очень помогла нам в выборе наиболее подходящих конструкций, материалов и процессов для минимизации затрат.

Ориентировочная стоимость модуля LASSIE-FP7 (табл. 2) выше, чем у стандартных крупноразмерных светодиодных модулей для профессионального освещения. Однако наш модуль предлагает функции, недоступные в стандартных продуктах, что делает модуль LASSIE-FP7 уникальным для сфер применений, где приоритетом является качество, а не затраты. Было определено, что наиболее подходящим применением модуля LASSIE-FP7 является создание акцентных цветовых зон в розничных магазинах одежды с предполагаемым размером рынка 50 000 единиц в год.

### Анализ производственных затрат

Как показано в таблице 2, производственные затраты составляют большую часть полной стоимости владения, и следовательно, их следует обсудить более подробно.

При расчете производственных затрат мы использовали МММ-модель стоимости (Man–Machine–Material — «человек–машина–материал» — три основные издержки производства). Дополнительно были учтены такие элементы, как накладные расходы (15%) и маржа (15%). Кроме того, в нашем методе анализа используется метод CAPM (модель оценки финансовых активов).

Стоимость, связанная с производством модуля LASSIE-FP7, описанного в предыдущих разделах, определяется стоимостью каждого компонента и стоимостью процесса сборки, а также включает трудозатраты, затраты на материалы, электроэнергию и эксплуатацию оборудования. Исходные условия анализа приведены в таблице 3.

Компонентами модуля являются светодиодная плата (включая элементы теплоотвода), решения для перераспределения

Таблица 3. Условия, использованные в анализе LCC, относящиеся к фазе производства

Объем рынка	50 000 модулей в год
Эксплуатация	5520 ч в год (три включения/выключения; пять дней в неделю)
Размер модуля	600×600 мм
Сборка модуля	€25–35 за единицу (субподряд)
Эксплуатационные расходы	5% от инвестиций
Запасы	нет
Световая отдача	90 лм/Вт
КЦТ	~3000 К
Цветные светодиоды (Luxeon 3535L)	882
Белые светодиоды (Luxeon 3014)	441

светового потока и цветопреобразования, а также система управления.

Наибольшую часть (86–87%) оценочной стоимости модуля LASSIE составляет стоимость материалов (рис. 11). В частности, светодиодная плата дает наибольший вклад (67% — рис. 12), поскольку здесь учитываются стоимость

самих светодиодов и связанных с ними процессов (подложка, пайка светодиодов и резисторов, элементы отведения тепла и т. д.). Другие компоненты платы (провода и терморезисторы) играют гораздо менее значительную роль.

В частности, цветные светодиоды LUXEON 3535L примерно в 6,5 раза дороже, чем

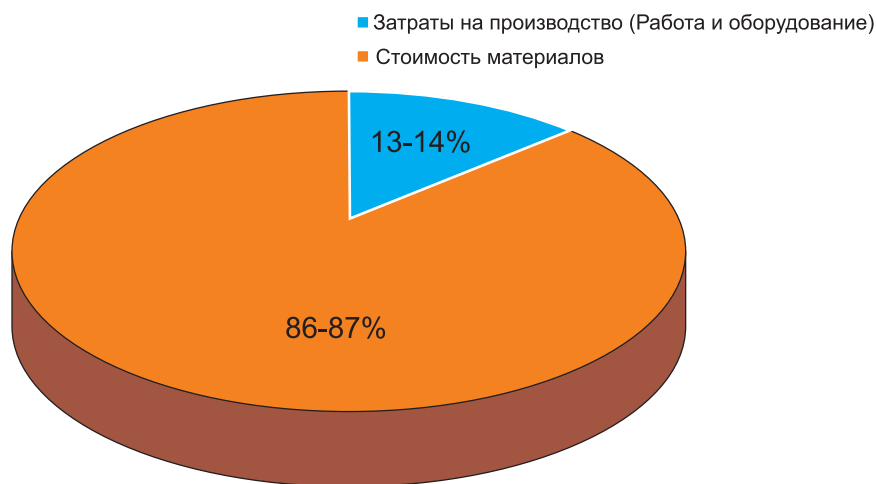


Рис. 11. Относительные затраты на материалы и производство модуля LASSIE-FP7

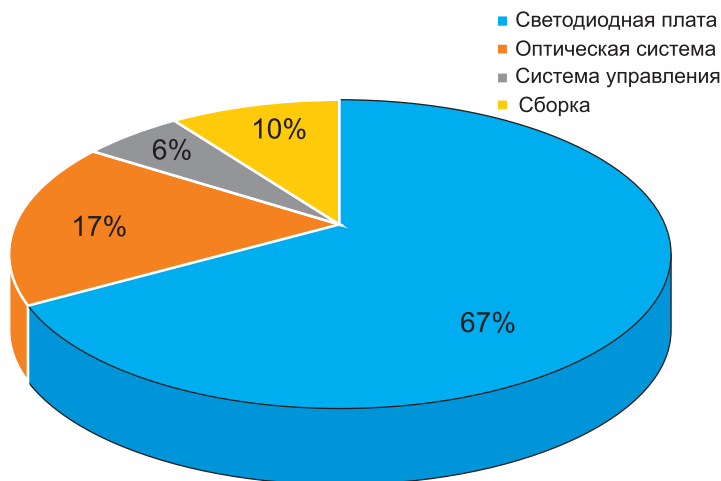


Рис. 12. Относительные затраты на сборку и компоненты, используемые в модуле LASSIE-FP7

**Таблица 4.** Технические характеристики светодиодных панелей МЕХХОТЕСН с возможностью настройки цвета и без нее

Модель	X1-40K-HI	X3-30K-56K-HI
Световой поток, лм	6900-7300	6700-7500
Световая отдача, лм/Вт	92-98	90-100
КЦТ, К	4000	Настраиваемая (3000-5600)
CRI	>90	>90
Размеры, мм	617×617×47,4	617×617×47,4
Срок службы, ч	>60 000	>60 000
Розничная цена (швейцарский франк)	695	1495 (без DALI)

холодные белые светодиоды LUXEON 3014 (€0,13 против €0,017 за штуку при закупке свыше 1 000 000 единиц). Это указывает на то, что возможности настройки/коррекции цвета представляют основной вклад в общую стоимость.

Этот результат согласуется с тенденцией, наблюдаемой в коммерчески доступных светодиодных панелях с регулировкой цвета. Например, МЕХХОТЕСН предлагает два аналогичных модуля (табл. 4) с настройкой цвета и без нее. Розничная цена последнего составляет менее половины цены модуля с регулировкой [23].

### Заключение

В данной статье было продемонстрировано, что тонкопленочная оптика потенциально может улучшить фотометрические и спектральные характеристики светодиодных панелей большой площади.

Применение трехслойной оптической системы, разработанной CSEM, продемонстрировало увеличение однородности яркости от нуля до 86% для значения DHR, значительно превышающего единицу.

С другой стороны, используя конкурентоспособную по стоимости технологию CCF от BASF, можно преобразовать низкокачественный свет, испускаемый недорогими голубоватыми светодиодами, в теплый белый цвет с высокой цветопередачей.

Также продемонстрирована регулировка цветности по кривой Планка с использованием трех независимо управляемых (цветных) каналов, однако для увеличения цветопередачи в холодном цвете требуется увеличение стоимости изделия. Наблюдаемое снижение цветопередачи с ростом цветовой температуры можно устранить за счет соответствующей комбинации цветных светодиодов с технологией CCF.

Применение цветных светодиодов позволяет корректировать цветность в случае

необходимости компенсации смещения координат цветности из-за деградации люминофора белых светодиодов, тем самым поддерживая цветность модуля постоянной на протяжении всего срока его службы.

Добавление функции регулировки цветности оказывает существенное влияние на себестоимость модуля, что обусловлено стоимостью цветных светодиодов. По этой причине такой модуль подходит для нишевых применений (например, акцентных цветовых зон в магазинах розничной одежды), где возможность регулировки цветности дает преимущества, превосходящие стоимость такого светильника. ●

*Оригинал статьи опубликован в журнале LED professional, март 2017.*

### Литература

1. M. N. Khan. Understanding LED Illumination. CRC Press. 2014.
2. R. R. Hainich and O. Bimber. Displays: Fundamental and Applications. CRC Press. 2011.
3. M. Bass. Handbook of Optics Volume II: Design, Fabrication and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry. McGraw Hill. 2010.
4. G. Stojmenovik. The whole story behind display specifications and human vision. [www.siongboon.com/projects/2010-08-22%20electronic%20ballast/The%20whole%20story%20behind%20display%20specifications%20and%20human%20vision.pdf](http://www.siongboon.com/projects/2010-08-22%20electronic%20ballast/The%20whole%20story%20behind%20display%20specifications%20and%20human%20vision.pdf)
5. P. R. Boyce. Human Factors in Lighting. CRC Press. 2014.
6. J. Bauer and M. Kreuzer. Understanding the Requirements for Automotive Displays in Ambient Light Conditions // Information Display 2016. № 3.
7. R. M. Soneira. Display Color Gamuts: From NTSC to Rec2020 // Information Display. 2016. № 4.

8. T. Gallaway, R. N. Olsen and D. M. Mitchel. The economics of global lighting pollution // Ecological Economics. 2010. № 69(3).
9. R. Chepesiuk. Missing the dark: Health effects of light pollution // Environmental Health Perspectives. 2009. № 117(1).
10. O. Fernandez. Ultrathin direct-lit LED module with beam shaping thin-film optics // Proc. of the LpS. Bregenz. Sept.20-22, 2016. Luger Research e.U.
11. O. Tapaninen, J. Ollila, E. Juntunen, K. Keränen. Thermal management in flexible substrates for LEDs. // Proc. of IMAPS Nordic Conf. Oulu, Finland. June 9-11, 2014.
12. S. Junger, N. Verwaal, W. Tschekalinskij and N. Weber. Near-infrared cut-off filters based on CMOS nanostructures for ambient light sensors and image sensors // Proc. SPIE 8994, Photonic and Phononic Properties of Engineered Nanostructures IV. February 19, 2014.
13. M. Wood. How bright is bright // Journal of Entertainment Technology Industry. Summer 2006. [www.mikewoodconsulting.com/articles.htm](http://www.mikewoodconsulting.com/articles.htm)
14. J. Koshel. Illumination Engineering: Design with Nonimaging Optics. Wiley. 2013.
15. S. Kobayashi, S. Mikoshiba and S. Lim. LCD Backlights. Wiley. 2009.
16. A. Abileah. LCD Backlight Methodology and Applications Using Optical Enhancement Films // Information display. August, 2008.
17. CIE International Lighting Vocabulary. CIE 17.4. 1987.
18. [https://bulbrite.com/wp-content/uploads/2016/10/soraa\\_quality\\_of\\_light\\_1.pdf](https://bulbrite.com/wp-content/uploads/2016/10/soraa_quality_of_light_1.pdf)
19. <https://ledlight.osram-os.com/2011/04/high-color-rendering-index-cri-led-lights/>
20. [www.ledsmagazine.com/articles/iif/2013/09/cree-launches-high-cri-led-lamp-that-meets-california-regulatory-spec.html](http://www.ledsmagazine.com/articles/iif/2013/09/cree-launches-high-cri-led-lamp-that-meets-california-regulatory-spec.html)
21. [www.lumileds.com/company/blog/design-approaches-for-high-cri-leds](http://www.lumileds.com/company/blog/design-approaches-for-high-cri-leds)
22. T. Q. Khanh, P. Bodrogi and T. Q. Vinh. Color Quality of Semiconductor and Conventional Light Sources. Wiley-VCH. 2017.
23. [www.mexxotech.com/english/led-lamps/x-series-ceiling-light](http://www.mexxotech.com/english/led-lamps/x-series-ceiling-light)
24. CIE TECHNICAL NOTE TN 001:2014: Chromaticity Difference Specification for Light Sources.